

四通道球面弯晶成像系统设计及实验研究^{*}

忻秋琪^{1,2}, 李亚冉^{1,2}, 陈 亮^{1,2}, 刘汉威^{1,2}, 徐 捷^{1,2}, 王 新^{1,2}, 穆宝忠^{1,2}

(1. 同济大学 教育部先进微结构材料重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 基于动态 X 射线荧光成像技术对高集光效率、单色化成像诊断设备的需求,提出了一种四通道球面弯晶成像系统设计。采用“圆锥体”空间排布方式,解决了多个通道耦合问题。通过调整弯晶姿态,实现了像点的合理分布。针对 4.51 keV 能点,采用 Ge(400)球面弯晶作为成像元件,给出了四通道弯晶成像系统的光学初始结构参数。在实验中利用 Ti 靶 X 射线光管,对单个通道进行了网格背光成像,获得的二维图像放大倍数为 7.8 倍,空间分辨率达到 15 μm ,初步验证了系统的成像性能。四通道弯晶成像系统与分幅相机结合,能有效解决动态 X 射线荧光成像技术信号弱、图像信噪比低的技术难点。

关键词: 球面弯晶; 动态 X 射线荧光成像; 单色成像; 空间分辨率

中图分类号: O434.1

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201931.190006

Design and experimental research of four-channel spherically bent crystal imaging system

Xin Qiuqi^{1,2}, Li Yaran^{1,2}, Chen Liang^{1,2}, Liu Hanwei^{1,2},

Xu Jie^{1,2}, Wang Xin^{1,2}, Mu Baozhong^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Advanced Micro-structured Materials, Ministry of Education,*

Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. *School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)*

Abstract: Since dynamic X-ray fluorescence imaging technology requires diagnostic equipment which has high throughput and narrow spectral width, we present the design of four-channel spherically bent crystal imaging system. The system adopts a cone spatial configuration to solve the problem of multiple channel coupling. With the size limit of framing camera taken into account, the images are reasonably planned by adjusting the position of bent crystal. We utilize Ge 400 crystal as the imaging component at 4.51 keV and then propose optical initial structural parameters of system. Grid backlit images of single channel are obtained by using X-ray tube in the laboratory. The magnification is 7.8, and the spatial resolution is 15 μm . The results preliminarily verify the performance of system. The four-channel system combined with the framing camera can effectively solve the technical difficulties such as weak signal and low signal to noise ratio in dynamic fluorescence imaging.

Key words: spherically bent crystal; dynamic X-ray fluorescence imaging; monochromatic imaging; spatial resolution

PACS: 07.85.Tt; 87.59.-e; 52.70.-m

极端条件下的流体运动规律如界面不稳定性、缺陷导致的射流、物质内流场分布等一直是惯性约束核聚变(ICF)研究的重点和难点^[1-3]。动态 X 射线荧光成像技术由于具备随动、局域、特异等特点,能够获得传统 X 射线背光照相技术难以得到的物理信息,是复杂流体演化诊断的新技术手段^[4-5]。但是,荧光成像信号微弱、易受噪声干扰,难以获得高信噪比的 X 射线图像,因此有必要开展具备高集光效率、准单色特性的成像系统研究。球面弯晶能够提供传统的诊断方法如针孔、Kirkpatrick-Baez 显微镜^[6-7]、Wolter 显微镜^[8]等难以兼顾的大数值孔径、高集光效率和高能量分辨力($\Delta E/E=10^{-3}\sim 10^{-4}$),非常适合用于微弱荧光信号的捕捉。国内外的大型激光装置上都开展了广泛的弯晶成像研究,以美国罗切斯特大学为代表的科研机构,在 OMEGA 装置上开

^{*} 收稿日期:2019-01-07; 修订日期:2019-03-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0403300)

作者简介:忻秋琪(1993—),男,硕士,主要从事 X 射线成像研究;xinqiuqi@tongji.edu.cn。

通信作者:穆宝忠(1975—),男,教授,主要从事 X 射线光学系统研究;mubz@tongji.edu.cn。

展了系列弯晶成像等离子体诊断实验^[9-10]。国内弯晶成像的研究以中国工程物理研究院、重庆大学等为代表^[11-13]，陈伯伦、杨正华等针对 1.472, 3.14 keV 能点，分别利用石英球面弯晶和云母球面弯晶进行了背光成像，取得了高分辨率的内爆靶丸单色投影图像。目前关于弯晶成像的研究以单通道为主，多通道系统鲜有报道，因此不具备开展时间诊断的能力。本文介绍了面向动态 X 射线荧光实验的四通道球面弯晶成像系统的设计，完成了基于实验室条件的初步系统性能验证。

1 球面弯晶成像的基本原理

球面弯晶兼具选能和成像功能。一方面，晶体是天然的分光器，X 射线晶体衍射需要满足布拉格公式

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

式中： d 是晶面间距， θ 是布拉格角， n 是衍射级次， λ 是 X 射线波长。另一方面，球面弯晶与球面镜类似，如图 1 所示，离轴情况下，X 射线经球面弯晶反射后不再是同心光束，在子午和弧矢方向分别聚焦，满足杨氏公式^[14]

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R\sin\theta} \quad (2)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2\sin\theta}{R} \quad (3)$$

式中： p 是物距， R 是球面弯晶的曲率半径， q_m 和 q_s 分别为子午焦线和弧矢焦线到弯晶的距离，两条焦线在主轴上的投影间距 $q_s - q_m$ 代表系统像散的大小。对于球面弯晶成像系统，布拉格角越大，即越接近于正入射情况时，像散越小，成像效果越好。为了获得最佳二维成像，探测器被放置在两散焦线之间最小模糊圆处^[15-16]

$$q = \frac{pR}{2p - R} \quad (4)$$

此时，系统放大倍数为 $M = q/p$ ，结合式(4)可得

$$p = \frac{R}{2} \left(\frac{M+1}{M} \right) \quad (5)$$

2 四通道系统设计

针对流体演化诊断的需求，设计了一个工作在 4.51 keV (TiK_{α1}) 能点的四通道球面弯晶成像系统。主要设计要求包括：第一，四个通道具有视场一致性，可以对同一观测目标进行成像；第二，所有弯晶都工作在特定的布拉格角下，存在空间排布的可能性，并且各个通道独立工作，互不干扰；第三，根据后端分幅相机成像微带的设计，需要对像点进行合理规划。

基于光学设计要求，结合实际应用场景，提出了“圆锥体”空间排布方案。如图 2 所示，四通道球面弯晶成像系统充分利用了“圆锥体”的几何结构特点，合理排布四块弯晶，实现了四个单通道球面弯晶成像系统的集成。每个通道占据一个圆锥半截面，物点 B、各通道球面弯晶法线交点 C 和分幅相机中点 D 都在圆锥中心轴 AD 上，而 AD 又被所有通道共用，因此在设计上满足视场一致性。基于系统设计紧凑、合理的原则，四块口径为 $L \times L$ 的球面弯晶被均匀放置在圆锥底面圆的上半圆周（半径为 r_{cone} ），相互之间的夹角为 β 。考虑到弯晶具有一定的几何尺寸，排布需要足够的空间，因此 r_{cone} 存在一个最小值，满足公式(6)。同时，

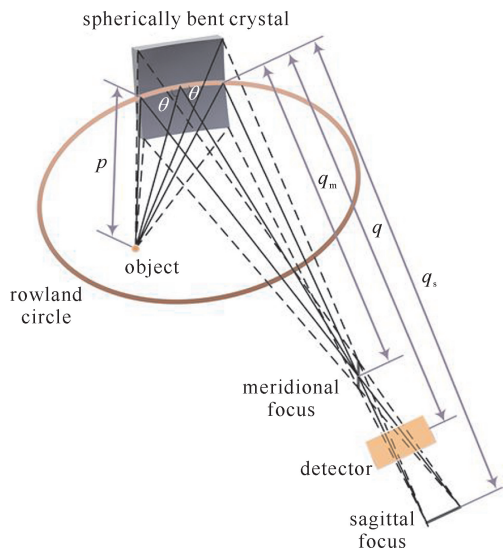


Fig. 1 Principle of spherically bent crystal imaging

图 1 球面弯晶成像原理

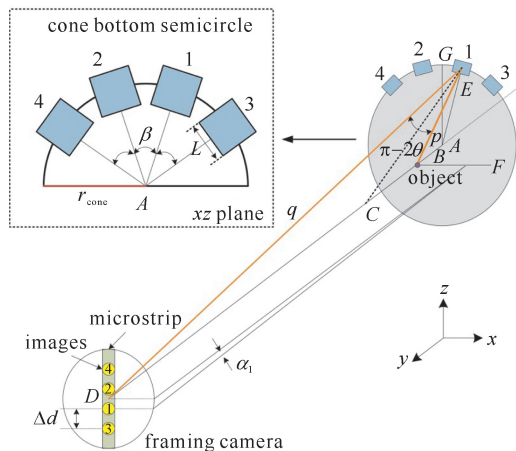


Fig. 2 Schematic diagram of four-channel spherically bent crystal imaging system

图 2 四通道球面弯晶成像系统示意图

r_{cone} 又与单个通道的光学设计有关。

$$r_{\text{cone}} \geq \frac{L \left(1 + \tan \frac{\beta}{2} \right)}{2 \tan \frac{\beta}{2}} \quad (6)$$

$$r_{\text{cone}} = \frac{R \sin 2\theta}{2 \sqrt{1 - \frac{4M}{(M+1)^2} \sin^2 \theta}} \quad (7)$$

由式(7)可知, r_{cone} 与 R 正相关, 与 θ 和 M 负相关, 即随着 R 的增大, θ 和 M 的减小, r_{cone} 随之增大。限制于弯晶加工和系统设计, 成像球面弯晶的曲率半径通常在 200~500 mm 之间, 系统放大倍率一般在 5~20 倍之间。上述条件约束了布拉格角的选择, 即对于多通道系统, 系统布拉格角不宜过大。通过文献调研^[17], 适合 4.51 keV 能点近正入射成像的晶体种类不多, 且入射布拉格角大多集中在 75°~80°之间, 80°以上常见易得的只有 Quartz(203), 但 Quartz(203)工作在 89.02°, 角度太大无法进行多通道系统耦合。综合考虑后, 最终选择 Ge(400)作为工作晶体。Ge 是半导体行业重要原材料, 获取较为容易, 且加工技术成熟。此外, Ge 是完美晶体^[18], 角度带宽窄、反射效率高, 非常适合用来单色化成像。在 4.51 keV 能点下, Ge(400)一级衍射的布拉格角为 76.4°, 符合多通道系统构建的需求, 但同时因为角度相对较小, 成像分辨率受散影影响大。

四通道球面弯晶成像系统需要和分幅相机配合, 从而在同一发次实验中获得不同时刻依次响应的 X 射线分幅图像, 实现对研究区域的动态观测。四通道球面弯晶成像系统的像点被规划成一行, 间隔为 Δd 。在当前“圆锥体”结构下, 物点 B 发出的 X 射线经过各个通道的弯晶反射后都将成像在分幅相机中点 D 。为了满足像点间隔, 需要将弯晶的姿态适当调整。就单一通道而言, 在保持物点位置和入射布拉格角不变的前提下, 通过围绕着物点的刚性旋转, 可以实现对像点位置的规划。以 1 号通道为例, 沿 x 轴负方向观察, 整个通道 ABDE 围绕着过物点 B 的轴 FB (FB 平行于 x 轴)逆时针旋转了 α_1 , 即 ABD 在 yz 平面内逆时针旋转了 α_1 , 实际成像位置才能到达规划像点处。由于 ABD 是所有通道共有, 各个通道的旋转可以理解为各个通道的 ABD 在 yz 平面内旋转相应角度。因此, 3 号通道需要绕着轴 FB 逆时针旋转 α_3 。与之对应, 2 号通道和 4 号通道需要顺时针分别旋转 α_2, α_4 。以顺时针为正方向, 四个通道的旋转角度大小如式(8)所示

$$\alpha_i = \begin{cases} (-1)^i \frac{\Delta d}{2 BD}, & i = 1, 2 \\ (-1)^i \frac{3\Delta d}{2 BD}, & i = 3, 4 \end{cases} \quad (8)$$

除此之外, 由于弯晶成像景深较小, 且四通道系统结构复杂, 系统瞄准将成为困扰实际应用的重要难题。针对这一难点, 在设计中采用物点指示杆配合光学瞄准节的方式予以解决, 实现靶点的快速瞄准。基于弯晶成像原理和多通道系统构建思路, 针对 4.51 keV 能点, 利用 Ge(400)作为工作晶体, 设计了一组四通道球面弯晶成像系统初始结构参数, 如表 1 所示。

表 1 四通道球面弯晶成像系统参数

Table 1 Parameters of four-channel spherically bent crystal imaging system

E/keV	crystal	$2d/\text{nm}$	$\theta/(\text{^\circ})$	L/mm	$\beta/(\text{^\circ})$	R/mm	p/mm	q_m/mm
4.51	Ge(400)	0.282 8	76.4	10	30	250	141	878
q_s/mm	q/mm	M	$\Delta d/\text{mm}$	$\alpha_1/(\text{^\circ})$	$\alpha_2/(\text{^\circ})$	$\alpha_3/(\text{^\circ})$	$\alpha_4/(\text{^\circ})$	
1463	1102	7.8	10	-0.29	0.29	-0.87	0.87	

考虑到本系统是一个单色化成像系统, 晶体的谱分辨能力尤为关键。因此, 在成像实验前利用 X 射线衍射仪(XRD)对 Ge(400)晶体的摇摆曲线进行了测量, 结果如图 3 所示, 其半高宽 FWHM 为 0.051°, 具有良好的谱分辨能力, 符合单色化成像需求。

3 成像实验

在实验室条件下, 开展了基于初始结构参数的单通道球面弯晶成像实验, 用于评估四通道系统的成像性能。因为实验室中无法模拟激光打靶产生荧光的应用场景, 因此采用对网格物背光成像的方式进行了分辨率检测。这种背光成像模式与荧光自发光相比, 背光源尺寸的大小会对系统的光学性能产生影响。如图4所示,

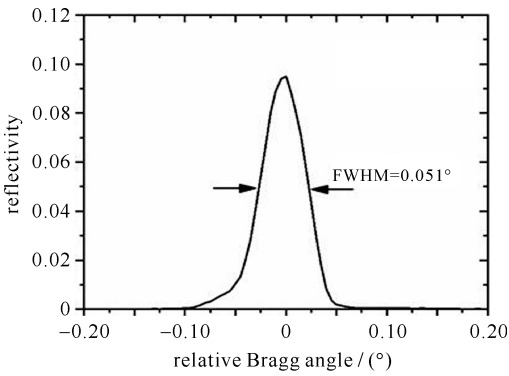


Fig. 3 XRD test result of Ge(400)
图 3 Ge(400)晶体 XRD 测试结果

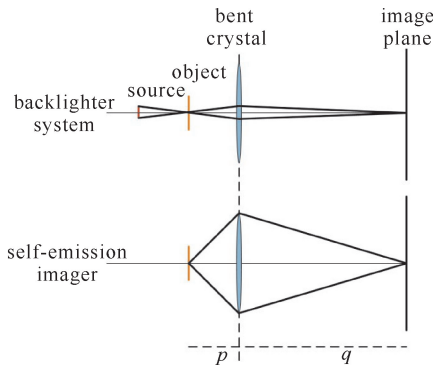
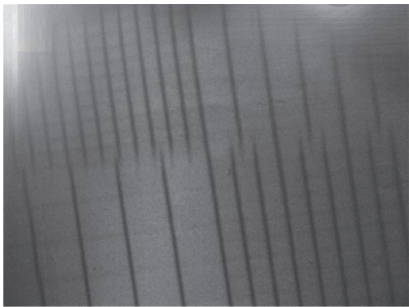


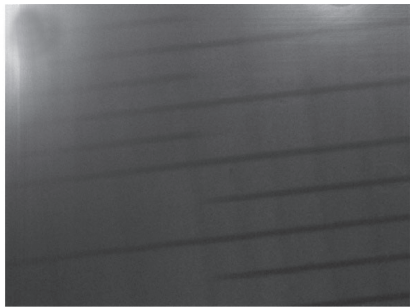
Fig. 4 Comparison between the backlighter system and self-emission imager
图 4 背光成像系统和自发光成像系统的区别

在自发光成像系统中,晶体被充分利用,系统的通光孔径取决于晶体的口径。而对于背光成像系统而言,背光源的大小以及背光源到物点的距离限制了晶体的实际工作区域,导致了系统的通光孔径小于晶体口径。这种差异意味着背光成像系统的空间分辨率往往优于自发光系统,但是视场范围小,集光效率低。两种成像方式在物像关系上具有一致性,只是通光孔径不同,分辨率的变化趋势是相同的。因此网格背光成像对于系统成像性能的评价具有实际意义。

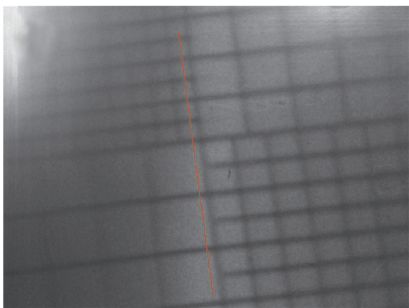
在实验室中,利用现有的 Ti 靶 X 射线光管,开展了成像实验。实验采用的是四象限网格,分别是 #150, #200, #300, #400 目 Cu 网,肋宽为 10 μm。用于采集图像的 CCD 工作范围为 9.0 mm×6.7 mm,像素尺寸为 6.45 μm。实验过程中,尽可能将 X 射线光管贴近网格,减轻因为背光带来的系统性能差异。由于成像系统采用的是工作在 76.4°的 Ge(400)球面弯晶,布拉格角相对较小,像散成了影响系统成像质量最为关键的因素。为了充分了解系统的成像性能,分别在子午焦线、弧矢焦线以及介于两者之间的理论最佳二维成像位置进行了成像实验,成像结果如图 5 所示。将 CCD 放置在像距为 878 mm 处,即理论上的子午焦线时,其网格图像如图 5(a)所示。从图中可以看出,此位置下,子午方向具有良好的聚焦效果,弧矢方向几乎没有聚焦,因此只能看到竖直网格线。当把 CCD 放置在像距为 1463 mm 的位置,即理论上的弧矢焦线时,其网格图像如图 5(b)



(a) image at meridional focus



(b) image at sagittal focus



(c) image at design position

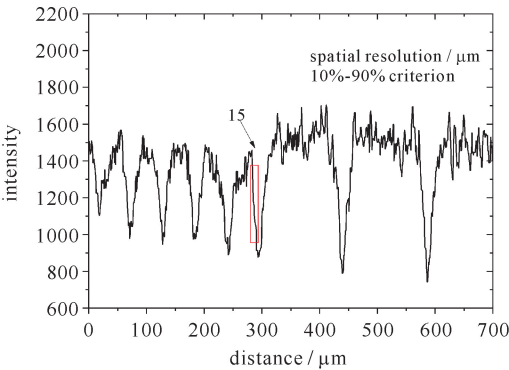


Fig. 5 Imaging result of single channel
图 5 单个通道的成像结果

所示。此时,只能明显看到水平网格线,这说明成像系统在子午方向聚焦较差,但在弧矢方向具有良好的聚焦效果。通过上述观察,子午焦线和弧矢焦线处的成像效果与理论一致。在此基础上,将探测器放置在了 1102 mm 处,即理论上最佳二维成像位置,此时其网格图像和强度分布如图 5(c)所示。与之前不同,在当前位置下可以明显看见网格形状,意味着两个维度都有良好的聚焦效果。为了定量衡量成像优劣,采用了 X 射线成像领域常用的空间分辨率评价方法,即 10%~90%标准^[19]。利用强度分布可以得到物方空间分辨率为 15 μm ,此时放大倍率为 7.8 倍。

4 结 论

针对动态 X 射线荧光成像的需求,本文提出了四通道球面弯晶成像系统的设计方案。分析了系统设计的思路 and 原则,解决了系统集成、共视场、像点分布等一系列问题。通过研究选择了 Ge(400)作为工作晶体,在此基础上给出了初始结构参数。基于实验室客观条件,利用 X 射线光管对网格背光成像的方式对单个通道进行了实验研究。在理论最佳二维成像位置,得到了清晰的网格图像,分辨率 15 μm 左右,实验结果与预期相符,为接下来仪器研发奠定了基础。

参考文献:

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] 吴俊峰, 缪文勇, 王立峰, 等. 神光 II 装置上间接驱动烧蚀瑞利-泰勒不稳定性实验分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032009. (Wu Junfeng, Miao Wenyong, Wang Lifeng, et al. Experimental analysis of indirect-drive ablative Rayleigh-Taylor instability on Shenguang II. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032009)
- [3] 蒲昱东, 陈伯伦, 黄天暄, 等. 激光间接驱动惯性约束聚变内爆物理实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032015. (Pu Yudong, Chen Bolun, Huang Tianxuan, et al. Experimental studies of implosion physics of indirect drive inertial confinement fusion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032015)
- [4] Yamamoto K, Watanabe N, Takeuchi A, et al. Mapping of a particular element using an absorption edge with an X-ray fluorescence imaging microscope[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2000, 7(1): 34-39.
- [5] Patton J A. X-ray fluorescence imaging[M]. US: Springer, 1980: 229-235.
- [6] Li Y, Mu B, Xie Q, et al. Development of an X-ray eight-image Kirkpatrick-Baez diagnostic system for China's laser fusion facility[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3311-3318.
- [7] Koch J A, Landen O L, Barbee T W, et al. High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the National Ignition Facility[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1784-1795.
- [8] 李亚冉, 谢青, 陈志强, 等. 激光等离子体诊断用 Wolter 型 X 射线显微镜的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 062002. (Li Yaran, Xie Qing, Chen Zhiqiang, et al. Optical design of Wolter X-ray microscope for laser plasma diagnostics. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 062002)
- [9] Stoeckl C, Delettrez J A, Epstein R, et al. Soft X-ray backlighting of direct-drive implosions using a spherical crystal imager on OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10E501.
- [10] Stoeckl C, Fiksel G, Guy D, et al. A spherical crystal imager for OMEGA EP[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 033107.
- [11] 刘利锋, 肖沙里, 钱家渝, 等. Z 箍缩装置的单色背光成像[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2275-2276. (Liu Lifeng, Xiao Shali, Qian Jiayu, et al. Monochromatic backlight imaging on Z-pinch facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2275-2276)
- [12] 陈伯伦, 韦敏习, 杨正华, 等. 球面弯晶的背光成像特性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 641-645. (Chen Bolun, Wei Minxi, Yang Zhenghua, et al. Character of backlight imaging based on spherically bent crystal. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 641-645)
- [13] 张强强, 魏来, 杨祖华, 等. 用于超热电子诊断的单色 X 射线成像技术[J]. *光学学报*, 2016(12): 324-329. (Zhang Qiangqiang, Wei Lai, Yang Zuhua, et al. Monochromatic X-ray imaging technology for diagnostics of hot electrons. *Acta Optica Sinica*, 2016(12): 324-329)
- [14] Howells. Mirrors for synchrotron-radiation beamlines[M]. Netherlands: Springer, 1994: 359-385.
- [15] Koch J A, Aglitskiy Y, Brown C, et al. 4.5- and 8- keV emission and absorption X-ray imaging using spherically bent quartz 203 and 211 crystals[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2130-2135.
- [16] Schollmeier M S, Geissel M, Shores J E, et al. Performance of bent-crystal X-ray microscopes for high energy density physics research[J]. *Applied optics*, 2015, 54(16): 5147-5161.
- [17] Koch J A. Imaging crystal/spectral line search[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1998.
- [18] Schollmeier M S, Loisel G P. Systematic search for spherical crystal X-ray microscopes matching 1-25 keV spectral line sources[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 123511.
- [19] Xie Q, Mu B, Li Y, et al. Development of high resolution dual-energy KBA microscope with large field of view for RT-instability diagnostics at SG-III facility[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2608.